

0-734624

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
ГЛАВНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ

На правах рукописи

УДК 523.98

Копылова Юлия Геннадьевна

**КОЛЕБАНИЯ КОРОНАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ АРОК
И ДИАГНОСТИКА ПЛАЗМЫ СОЛНЕЧНЫХ ВСПЫШЕК**

Специальность 01.03.02 астрофизика и радиоастрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург 2002 г.

Работа выполнена в Главной астрономической обсерватории РАН.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор
А. А. Соловьев,

доктор физико-математических наук
А. В. Степанов.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
А. Н. Коржавин,

доктор физико-математических наук
Л. В. Яснов.

Ведущая организация:

Научно-исследовательский радиофизический институт, Нижний Новгород.

Защита диссертации состоится 27 декабря 2002 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета К 002.120.01 Главной астрономической обсерватории РАН по адресу: 196140, Санкт-Петербург, Пулковское шоссе. 65/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГАО РАН.

Автореферат разослан 22 ноября 2002 г.

Учсный секретарь диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



Е. В. Милецкий

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Магнитные арки (петли) – типичный структурный элемент солнечной короны. С ними связывают такие нестационарные явления в атмосфере Солнца, как корональные транзиенты и солнечные вспышки, которые определяют состояние межпланетного космического пространства, а также многие геофизические процессы. Поэтому исследование физических условий и процессов в корональных арках является одной из наиболее актуальных проблем современной астрофизики.

Колесательные и волновые процессы – неотъемлемый атрибут динамики солнечной атмосферы. Наблюдения солнечных вспышек и в широком диапазоне длин волн показывают, что излучение часто промодулировано квазипериодическим образом [1]. Выяснение природы пульсаций является предметом активных исследований. В настоящее время установлена тесная связь между вспышками и корональными магнитными структурами, поэтому вероятно, что за наблюдаемую модуляцию излучения могут быть ответственны магнитогидродинамические (МГД) колебания корональных арок [2, 3].

С запуском космических аппаратов SOHO, TRACE, RHESSI появилась уникальная возможность исследовать верхние слои солнечной атмосферы с высоким пространственным разрешением. Это позволило обнаружить квазипериодические смещения солнечных корональных петель [2]. Таким образом, впервые были получены прямые указания на то, что колебания корональных арок реально существуют. Основная особенность этих колебаний, отождествленных в [2] с быстрой изгибной модой, заключалась в их низкой добротности, причина которой по-прежнему вызывает много споров [4, 5] и требует дополнительных исследований.

Наиболее эффективно модулируют излучение радиальные быстрые магнитозвуковые (БМЗ) колебания корональных петель (мода типа перетяжек) [2]. Характерный период которых составляет несколько секунд. Согласно наблюдениям [3, 6], иногда секундные пульсации в микроволновом излучении продолжаются минуты и даже часы. Однако, как показывают оценки [7, 8], затухание радиальных колебаний из-за излучения МГД волн в окружающую среду (акустический механизм) и процессов диссипации должно быть значительным. Следовательно, важной задачей является определение условий при которых радиальные колебания обладают высокой добротностью.

Пульсации излучения могут быть связаны также с баллонной модой, соответствующей осцилляциям плазменных «язычков», возникших в областях

корональной магнитной арки с повышенным газовым давлением [9]. Число пульсаций излучения, вызванных баллонными колебаниями петли, обычно невелико, что указывает на сильное затухание. Необходимо выяснить причину сильного затухания баллонных колебаний корональных петель. Поэтому особую важность приобретает исследование механизмов возбуждения и затухания осцилляции в корональных петлях.

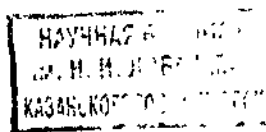
Анализ осцилляции корональных петель даст важную информацию о физических условиях в области вспышечного энерговыделения [3, 10]. В связи с проблемами происхождения вспышек и нагрева короны в гелиофизике возникло и интенсивно разрабатывается новое направление, названное «корональной гелиосейсмологией». Особый интерес представляет задача определения величин магнитных полей корональных арок, поскольку до сих пор оценки их значений варьируются в широких пределах — от нескольких десятков до тысячи Гаусс [10]. Это связано с тем, что прямые измерения магнитных полей по эффекту Зессмана затруднены из-за высокой температуры плазмы, а результаты косвенных методов сильно зависят от принятых модельных представлений. Механизмы генерации радиоизлучения чрезвычайно чувствительны к изменениям магнитного поля, поэтому наблюдения солнечных вспышек в данном диапазоне длин волн приобретают особую ценность. Следовательно, для оценки магнитных полей по параметрам пульсаций необходимо определить влияние возбуждения колебаний петли на модуляцию вспышечного радиоизлучения.

Основной проблемой адекватного построения теоретических моделей солнечных вспышек является недостаток информации о значениях параметров вспышечной плазмы (плотности, температуры, магнитного поля). Поэтому необходима разработка новых методов диагностики плазмы, основанных на анализе параметров пульсаций излучения и сопоставлении наблюдательных данных, полученных в различных волновых диапазонах.

Цели работы

Ставятся и решаются следующие задачи:

1. Создать энергетический метод расчета дискремента акустического затухания собственных колебаний корональных петель.
2. Определить причину сильного затухания изгибных и баллонных колебаний петель, а также условия существования высокочастотных радиальных колебаний.



3. Исследовать влияние колебаний корональных петель на модуляцию нестеплового гиросинхротронного излучения солнечных вспышек.
4. На основе наблюдательных данных о параметрах пульсаций микроволнового излучения, вызванных МГД колебаниями корональных петель, разработать новые методы диагностики вспышечной плазмы, в частности магнитных полей и спектров энергичных электронов.
5. Провести анализ и сопоставление данных наблюдений вспышечных событий 31 октября 1991 г. и 14 июля 2000 г. в радио- и рентгеновском диапазоне с целью выяснения особенностей динамики ускоренных электронов в корональных магнитных арках.

Научная и практическая значимость работы

1. Анализ механизмов затухания колебаний солнечных корональных петель позволяет объяснить наблюдаемую низкую добротность изгибных и баллонных колебаний, а также даст возможность определить условия возбуждения высокочастотных радиальных колебаний, ответственных за продолжительные пульсации микроволнового излучения солнечных вспышек.
2. Исследование влияния возбуждения МГД колебаний корональных магнитных арок на модуляцию нестеплового гиросинхротронного излучения открывает новые возможности для диагностики параметров плазмы.
3. Представление корональной арки в виде магнитной ловушки (коронального пробкотрона) позволяет объяснить наблюдаемые временные задержки между наступлением пиков микроволнового и жесткого рентгеновского излучения. По длительности и характеру временных задержек удастся определить режим питч угловой диффузии частиц в конус потерь.
4. Сопоставление радио- и рентгеновских наблюдений солнечных вспышек позволяет провести диагностику вспышечной плазмы.

Научная новизна

1. Создан и детально разработан новый энергетический метод расчета декремента акустического затухания МГД колебаний корональных петель, обобщающий результаты, полученные из дисперсионного уравнения, и

адекватно учитывающий комплексность аргументов цилиндрических функций, входящих в его решения. Анализ акустического затухания, проведенный на основе разработанного энергетического метода показал, что наблюдаемое сильное затухание изгибных колебаний обусловлено распространением бегущих волн вдоль магнитных силовых линий. В то же время, радиальные колебания являются высокодобротными в случае плотных корональных петель, когда узлы колебаний возмущения полного давления или радиальной скорости совпадают с границей магнитной трубки.

2. Проведен сравнительный анализ различных диссипативных процессов показавший, что затухание МГД колебаний корональных арков из-за ионной вязкости и электронной теплопроводности превосходит затухание, вызванное радиационными и джоулевыми потерями. Сделан вывод о том, что добротность баллонных колебаний в основном определяется электронной теплопроводностью корональной плазмы.
3. Впервые проведено исследование влияния возбуждения МГД колебаний корональных петель на модуляцию теплевого гиротропного излучения солнечных вспышек. Найдено, что для оптически тонкого и оптически толстого источника пульсации излучения, вызванные радиальными колебаниями, происходят в противофазе. Получены соотношения, позволяющие по глубине модуляции микроволнового излучения оценивать магнитное поле и энергетический показатель спектра ускоренных электронов в области вспышечного энерговыделения.

На защиту выносятся:

1. Энергетический метод расчета декремента акустического затухания МГД колебаний корональных петель, обобщающий результаты, полученные из дисперсионного уравнения, и адекватно учитывающий комплексность аргументов цилиндрических функций, входящих в его решения.
2. Результаты анализа затухания изгибных, радиальных и баллонных колебаний корональных арков, которые показывают, что наблюдаемое сильное затухание изгибных колебаний обусловлено распространением бегущих волн вдоль магнитных силовых линий: радиальные колебания являются высокодобротными в случае плотных корональных петель, когда узлы

колебаний возмущения полного давления или радиальной скорости совпадают с границей магнитной трубки; добротность баллонных колебаний в основном определяется электронной теплопроводностью корональной плазмы.

3. Метод диагностики энергетического показателя спектра ускоренных электронов и магнитного поля в области вспышечного энерговыведения по глубине модуляции нестепенового гиросинхротронного излучения, одновременно принимаемого на двух частотах. Причем источник излучения на одной из данных частот (более низкой) является оптически толстым, а на другой — оптически тонким.
4. Метод диагностики температуры, концентрации и магнитного поля вспышечной плазмы по глубине модуляции добротности и периоду пульсаций микроволнового излучения, вызванных баллонными колебаниями корональной магнитной арки.
5. Интерпретация наблюдавшихся в событиях 31 октября 1991 г. и 14 июля 2000 г. особенностей микроволнового и рентгеновского излучения взаимодействием волна-частица в рамках модели коронального пробкотрона с развитой электромагнитной турбулентностью.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы были представлены на конференциях: «Солнце в максимуме активности и солнечно-звездные аналогии» (Пулково. Санкт-Петербург, 2000 г.), «Солнечная активность и внутреннее строение Солнца» (п. Научный. Крым, Украина, 2001 г.), «Всероссийская астрономическая конференция» (Санкт-Петербург, 2001 г.). «Солнечная активность и параметры ее прогноза» (п. Научный, Крым, Украина, 2002 г.), «Активные процессы на Солнце и звездах» (Санкт-Петербург, 2002 г.), «International Symposium on Physical Processes Associated with the Sun» (Weihai. China, 2002). 10th European Meeting on Solar Physics «Solar Variability: from Core to Outer Frontiers» (Prague. Czech Republic, 2002), «Вторая Украинская конференция по перспективным космическим исследованиям» (п. Кацивели, Крым. Украина. 2002 г.), школе семинаре молодых радиоастрономов (Пушино, 2001 г.), докладывались на научных семинарах ГАО РАН, КРАО, Purple Mountain Observatory CAS (Nanjing, China).

Личный вклад автора

Во всех работах по теме диссертации автору принадлежит равная с соавторами доля участия в формулировке задач, проведении расчетов и анализе полученных результатов. В работе 4 автором также проводилась обработка данных наблюдений радиотелескопа РТ-22 КрАО.

Структура и объем диссертационной работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитированной литературы из 124 наименований. Общий объем диссертации составляет 122 страницы. Она содержит 21 иллюстрацию.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обосновывается актуальность и научная новизна темы диссертации. Приводятся краткое содержание диссертационной работы и результаты, выносимые на защиту.

В **Главе I** «МГД колебания солнечных корональных петель» проведен анализ наблюдательного материала, свидетельствующего об осцилляциях солнечных корональных арок: данных о пульсациях излучения и результатов прямых наблюдений. Кратко рассмотрены основные модели возникновения пульсаций излучения. Выведено дисперсионное уравнение для собственных мод плазменного цилиндра и описаны свойства изгибных и радиальных колебаний. С помощью решения дисперсионного уравнения для собственных мод магнитной трубки получено выражение для декремента акустического затухания изгибной моды. На основе закона сохранения энергии разработан новый энергетический метод расчета декремента акустического затухания, учитывающий комплексный характер аргументов цилиндрических функций, входящих в решение дисперсионного уравнения. Произведено сопоставление результатов, полученных двумя указанными методами, показавшее, что при соответствующих предположениях они хорошо согласуются.

Сравнение различных диссипативных процессов для быстрых магнитозвуковых волн показало, что затухание колебаний из-за ионной вязкости и электронной теплопроводности превосходит затухание, вызванное радиационными и джоулевыми потерями. В то же время, акустический механизм определяет затухание изгибных и радиальных колебаний корональных петель, а роль процессов диссипации при этом незначительна. Затухание из-

гибных колебаний оказывается пренебрежимо малым, если распространение волн происходит в направлении перпендикулярном магнитному полю. Обнаруженная на космическом телескопе TRACE [2] низкая добротность колебаний петель активной области связана с генерацией бегущих МГД волн распространяющихся вдоль магнитных силовых линий. В свою очередь, радиальные осцилляции корональных арк оказываются высокодобротными, если плотность плазмы внутри магнитной трубки более чем на два порядка превосходит плотность плазмы снаружи, а узлы колебаний полного давления или радиальной скорости совпадают с границей трубки.

Рассмотрены баллонные колебания солнечных корональных петель возникающие на импульсной фазе вспышки. С помощью дисперсионного уравнения, описывающего баллонные возмущения малой амплитуды, определен период колебаний плазменного «языка». На основе аналогии баллонных и БМЗ колебаний проведено исследование роли диссипативных процессов в затухании баллонной моды. Сделан вывод о преобладающем влиянии электронной теплопроводности вспышечной плазмы на затухание баллонных колебаний.

В Главе II «Модуляция микроволнового излучения солнечных вспышек» проведено исследование влияния возбуждения радиальных и баллонных колебаний корональных петель на петлевого гиросинхротронное излучение солнечных вспышек. Радиальные и баллонные колебания меняют поперечные размеры петли, термодинамические параметры плазмы и магнитное поле, следовательно следует ожидать модуляцию излучения во всех диапазонах длин волн. В случае, когда микроволновое излучение вспышек обусловлено петлевым гиросинхротронным механизмом проанализировано влияние возбуждения колебаний петель на интенсивность излучения.

Рассмотрена модель коронального пробкотрона, в рамках которой вспышечная арка представляет собой магнитную ловушку. При этом за микроволновое излучение вспышки ответственны захваченные частицы, за жесткое рентгеновское – пролетные, проникающие в основания петли. В случае кулоновского рассеяния захваченных электронов в конус потерь на основе модели толстой мишени Сыроватского Шмелевой [11] получено соотношение между потоками жесткого рентгеновского излучения в вершине петли и ее основаниях. Показано, что в ходе вспышечного энерговыделения реализуются различные режимы пинч угловой диффузии частиц в конус потерь, что позволяет объяснить временные задержки между наступлением пиков рентгеновского и микроволнового излучения.

В рамках модели коронального пробкотрона проведено исследование влияния возбуждения колебаний петель на модуляцию концентрации захваченных частиц, ответственных за микроволновое излучение. Из проведенного анализа следует, что в режиме умеренной диффузии, который имеет место в случае достаточно мощных вспышек, изменения концентрации частиц не происходит. Установлено, что осцилляции излучения для оптически толстого и оптически тонкого источника происходят в противофазе. Предложен метод диагностики энергетического показателя спектра ускоренных электронов и магнитного поля по глубине модуляции излучения, одновременно принимаемого на двух частотах, когда источник излучения на более низкой частоте является оптически толстым, а на высокой — оптически тонким.

Для случая, когда модуляция излучения вызвана баллонными колебаниями петли, получены выражения, позволяющие проводить диагностику вспышечной плазмы (температуры, концентрации частиц, магнитного поля) по параметрам пульсаций в микроволновом диапазоне: глубине модуляции, добротности и периоду.

Глава III «Диагностика вспышечной плазмы» посвящена определению параметров вспышечной плазмы на основе описанных в Главе II методов диагностики. Особенности микроволнового и рентгеновского излучения анализируемых вспышек позволили продемонстрировать диагностические возможности модели коронального пробкотрона и модели МГД колебаний вспышечных корональных петель. Рассмотрены четыре вспышечных события.

- Для события 23 мая 1990 г., одновременно наблюдавшегося на 9.375 ГГц (Nanjing University Observatory) и на 15 ГГц (Beijing Normal University Observatory), особенностью тонкой временной структуры являлось наличие пульсаций с периодом 1.5 с, причем пульсации излучения происходили на двух волнах в противофазе [3]. Поскольку источник излучения на 15 ГГц являлся оптически тонким, а на 9.375 ГГц — оптически толстым, то с помощью разработанного в Главе II метода диагностики определено значение энергетического степенного показателя спектра ускоренных электронов $\delta \approx 4.4$ и величины магнитного поля в области вспышечного энерговыделения $B \approx 190$ Гс.
- Сопоставление наблюдений вспышки 31 октября 1991 г., полученных на РТ-22 КрАО (длины волн 8 мм и 13 мм), с данными, полученными в рентгене на космических аппаратах («Yohkoh», BATSE, GOES), позволило объяснить наблюдаемое несоответствие временных профилей радио-

и рентгеновского излучения в рамках модели коронального пробкотрона с развитой электромагнитной турбулентностью и определить механизм радиоизлучения — петлевой гиротропный. С помощью методики Томаса и др. [12] по временным профилям мягкого рентгена (GOES) построены зависимости температуры T и меры эмиссии EM от времени. Характерные значения которых оказались $T = 10^7$ К и $EM = 10^{48}$ см³. На основе поляризационных измерений, выполненных на РТ-22 КРАО, оценены величина магнитного поля $B = 140 - 200$ Гс, количество ускоренных электронов $N_a \approx 10^{34}$, их энергия $E_a \approx 10^{26}$ эрг и среднее значение показателя спектра $\delta = 3.5$, что согласуется с независимыми оценками параметров всплесчных петель и энергичных электронов по радио- и рентгеновским данным [3, 8].

- Для вспышки 8 мая 1998 г. с помощью Фурье анализа временного профиля излучения, полученного на радиогелиографе «Nobuyama» на частоте 17 ГГц, были обнаружены пульсации с характерным периодом 16 с и относительной глубиной модуляции $\sim 30\%$. Форма источника излучения — корональной арки в жестком рентгене, в соответствии с данными спутника «Yohkoh», представляла собой совокупность плазменных «языков», что свидетельствует о развитии баллонной моды желобковых возмущений. Пульсации радио- и рентгеновского излучения связаны с малыми колебаниями плазменных «языков». С помощью метода диагностики, описанного в Главе II, по параметрам пульсаций определены: концентрация плазмы $n \sim 1.5 \times 10^{11}$ см⁻³, температура $T \sim 3 \times 10^7$ К и величина магнитного поля $B \approx 280$ Гс, что не противоречит существующим представлениям о всплесчных петлях [13].
- На основе наблюдательных данных, полученных с помощью РТ-22 КРАО на частотах 8.6, 13.3 и 15.4 ГГц, проведен анализ микроволнового излучения солнечной вспышки «Бастилия» 14 июля 2000 г. — наиболее мощного с 1989 г. протонного события. Производная в ходе вспышки смена знака поляризации микроволнового излучения связана со смещением источника ускоренных электронов из западной части активной области в восточную с иной магнитной конфигурацией, выявленным по наблюдениям спутника TRACE [14]. Сопоставление временных профилей жесткого рентгеновского излучения, полученных на «Yohkoh», с данными наблюдений на сантиметровых волнах позволило обнаружить длительные временные задержки (более минуты) между наступлением пиков жесткого рентгеновского и микроволнового излучения. Причем величина за-

дсржки возрастала по мере развития вспышки. Эти особенности связаны с реализацией режима сильной питч угловой диффузии в рамках модели коронального пробкотрона.

В Заключении сформулированы основные результаты работы:

Создан и детально разработан энергетический метод расчета декремента акустического затухания МГД колебаний корональных петель, обобщающий результаты, полученные из дисперсионного уравнения, и адекватно учитывающий комплексность аргументов цилиндрических функций, входящих в его решения.

Проведен анализ затухания изгибных, радиальных и баллонных колебаний корональных арок. Показано, что наблюдаемое сильное затухание изгибных колебаний обусловлено распространением бегущих волн вдоль магнитных силовых линий. Радиальные колебания являются высокочастотными в случае плотных корональных петель, когда узлы колебаний возмущения полного давления или радиальной скорости совпадают с границей магнитной трубки. Сделан вывод о том, что добротность баллонных колебаний в основном определяется электронной теплопроводностью корональной плазмы.

Исследовано влияние возбуждения МГД колебаний корональных петель на модуляцию петлевого гиросинхротронного излучения солнечных вспышек. Найдено, что для оптически тонкого и оптически толстого источника пульсации излучения, вызванные радиальными осцилляциями, происходят в противофазе. Получены соотношения, позволяющие по глубине модуляции микроволнового излучения оценивать магнитное поле и энергетический показатель спектра ускоренных электронов в области вспышечного энерговыделения.

Для случая, когда модуляция излучения вызвана баллонными колебаниями петли, получены выражения, позволяющие проводить диагностику вспышечной плазмы и магнитного поля по следующим параметрам пульсаций в микроволновом диапазоне: глубине модуляции, добротности и периоду.

В рамках модели коронального пробкотрона с развитой электромагнитной турбулентностью объяснены наблюдаемые особенности поведения временных профилей микроволнового и жесткого рентгеновского излучения в событиях 31 октября 1991 г. и 14 июля 2000 г.

Основные публикации по теме диссертации

1 Копылова Ю. Г., Цап Ю. Т. «Об акустическом затухании изгибных колебаний солнечных корональных петель» // Известия ГАО. 2000. № 215. С. 301- 310.

2 Цап Ю. Т., Копылова Ю. Г. «Механизм акустического затухания быстрых изгибных колебаний корональных петель» // Письма в Астрономический журнал. 2001. Т. 27. № 11 С. 859 -86С

3 Цап Ю. Т, Копылова Ю. Г. Нестеров Н. С. «Миллиметровое и рентгеновское излучение солнечной вспышки 31 октября 1991» // Космодинамика и физика небесных тел 2002. Т. 18. № 1 С.3- 17

4 Копылова Ю. Г. , Цап Ю. Т. , Цветков Л. И. «Событие 14 июля 2000 г.: микроволновое излучение» // Известия КрАО.2002. Т. 98. С. 84- 90

5 Копылова Ю. Г., Степанов А. В. , Цап Ю. Т. «Радиальные колебания корональных петель и микроволновое излучение солнечных вспышек» // Письма в Астрономический журнал 2002. Т. 28. № 11. С. 870-879

6 Копылова Ю. Г. , Степанов А. В. «О затухании колебаний балюнной моды в корональных арках» // Известия ГАО. 2002. № 216.



ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 *Aschwanden M J* Theory of radio pulsations in coronal loops // *Solar Phys* 1987 V 111 № 1 P 113 136
- 2 *Aschwanden M J, Fletcher L, Schryver C J et al* Coronal loop oscillations observed with the *Transition Region and Coronal Explorer* // *Astrophys J* 1999 V 520 № 2 P 880 894
- 3 *Qin Z, Li C, Fu Q, Gao Z* Dual pulsations in solar radio bursts at short centimeter wavelengths // *Solar Phys* 1996 V 163 P 383 396
- 4 *Nakanakov V M, Ofman L, DeLuca E E et al* TRACE observations of damped coronal loop oscillations implications for coronal heating // *Science* 1999 V 285 P 862 864
- 5 *Schryver C J, Brown D S* Oscillations in the magnetic field of solar corona in response to flares near the photosphere // *Astrophys J* 2000 V 537 № 1 L69 L72
- 6 *Zodi A M, Kaufmann P, Zirin H* Persistent 15 s oscillations superimposed to a solar burst observed at two mm wavelengths // *Solar Phys* 1984 V 92 P 283 298
- 7 *Зайцев В В, Степанов А В* О природе пульсаций солнечного радиоизлучения IV типа // Исследования по космизму, астрономии и физике Солнца 1975 Т 37 С 3 10
- 8 *Зайцев В В, Степанов А В, Цап Ю Т* Некоторые проблемы физики солнечных и звездных вспышек // Космолитика и физика небесных тел 1994 Т 10 № 6 С 3 31
- 9 *Shibasaki K* Observational evidence of ballooning instabilities in a solar flare // Proc Nobeyama symposium NRO / Eds Bastian T Gopalswamy N, Shibasaki K 1998 № 479 P 419 423
- 10 *Nakanakov V M, Ofman L* Determination of the coronal magnetic field by coronal loop oscillations // *Astron Astrophys* 2001 V 372 L53 L56
- 11 *Сыроватский С И, Шмелева О П* Нагрев плазмы быстрыми электронами и нестационарное рентгеновское излучение при солнечных вспышках // Астрономический журнал 1972 Т 49 № 2 С 334 347
- 12 *Thomas R J, Stair R, Crannell C J* Expressions to determine temperatures and emission measures for solar X ray events from GOES measurements // *Solar Phys* 1985 V 95 № 1 P 323 329
- 13 *Doschek G A* The electron density in the localized bright regions at the tops of flare loops // Proc Kofu Symposium NRO / Eds Enome S Hirayama T 1994 № 360 P 173 175
- 14 *Klein K L, Trottet G, Lantos P, Delaboudiniere J P* Coronal electron acceleration and relativistic proton production during the 14 July 2000 flare and CME // *Astron & Astrophys* 2001 V 373 P 1073 1082